

DAÑOS EN EL CANAL “LOS MOLINOS – CÓRDOBA” ATRAVESANDO SUELOS COLAPSABLES DE ARGENTINA¹

Roberto Terzariol²

Resumen: La región semiárida central de la República Argentina, en particular la ciudad de Córdoba, presenta distintos tipos de suelos loésicos, con serios problemas de asentamientos debido al colapso de su estructura interna, cuando el suelo se humedece. La mayoría de estos suelos requieren de carga externa para que el fenómeno se produzca (potencialmente colapsables) y aproximadamente en el 15% del área se hallan suelos autocolapsables, es decir que colapsan bajo su propio peso sin necesidad de carga externa. Cuando estos suelos están cargados por alguna construcción, el problema se agudiza considerablemente. Para estudiar estos comportamientos y tipificarlos, existen ensayos específicos tanto de laboratorio como in-situ. En este artículo se presenta un caso que ilustra la problemática planteada, mediante el análisis de un canal de abastecimiento de agua para potabilización y riego, que durante los últimos 20/40 años sufrió asentamientos importantes por problemas de autocolapso.

Palabras claves: obras lineales, suelos colapsables, suelos no saturados.

DAMAGES IN THE CHANEL “LOS MOLINOS – CORDOBA” IN COLLAPSIBLES SOILS OF ARGENTINA

Abstract: The central semiarid region of Argentina, particularly the city of Córdoba, has different types of loessic soils, with serious problems of settlement due to collapse of its internal structure when the ground is wet. Most of these soils require external load so that the phenomenon occurs (potentially collapsing soils) and approximately in 15% of the area it can be found autocolapsing soils, in which the collapse occurs under its own weight without external load. When these soils are loaded for any construction, the problem is heightened considerably. To study these behaviors and to classify them, there are specific laboratory and “in situ” tests. This article shows a case history that illustrates the issues, through the analysis of a channel constructed for water transportation for potabilization and irrigation, which during the last 20/40 years suffered considerable damage.

Keywords: collapsing soils, linear facilities, unsaturated soils.

INTRODUCCIÓN

Generalidades

En este artículo se presenta el caso de estudio referido a la problemática de los suelos colapsables. Se describen los suelos colapsables en la región geográfica estudiada, se los tipifica y caracteriza mediante ensayos de laboratorio y de campo. Se evalúan y caracterizan los daños en un canal para abastecimiento de agua y riego, tomando en consideración los efectos del agua de aporte lateral y la cuenca de aporte involucrada.

Los suelos colapsables

A partir de la segunda mitad del siglo XIX, destacados científicos alemanes y franceses que formaron la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba y la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, describen la existencia de suelos loésicos en la región central de Argentina. Geológicamente la formación en la que se hallan los mismos se la denomina Pampeano según Castellanos (1952) y Frenguelli (1957). Los suelos colapsables fueron ya descriptos por Scheidig en su libro clásico de 1934, pero en el ámbito local las primeras contribuciones se produjeron por Bolognesi et al. (1957 y 1975) y Reginatto (1970).

¹ Artículo recibido el 5 de octubre de 2011 como parte del 2^{do} Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

² Profesor Titular, Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. E-mail: reterzariol@gmail.com

Los suelos limosos de origen eólico con estructura metaestable frente a los incrementos en su contenido de humedad, ocupan una parte importante de la región semiárida central de la República Argentina. Dentro de estos suelos metaestables, los denominados autocolapsables ante el incremento de humedad, pueden sufrir el colapso de su estructura interna bajo la acción de su peso propio, es decir sin necesidad de modificar las solicitaciones externas que actúan inicialmente. Particularmente, la provincia de Córdoba presenta espesores importantes de este tipo de suelos, generando problemas en las obras de ingeniería fundadas sobre ellos o que atraviesan los mismos.

La provincia de Córdoba presenta distintos tipos de suelos loésicos, con diferencias en los asentamientos debido al colapso de la estructura interna, cuando el suelo se humedece. La mayoría de estos suelos requieren de carga externa para que el fenómeno se produzca y aproximadamente en el 15% del área son autocolapsables bajo su propio peso, sin necesidad de mediar carga externa alguna (Rocca et al., 2006). Cuando estos suelos están cargados por alguna construcción, el problema se agudiza considerablemente.

Para estudiar estos comportamientos y tipificarlos, existen ensayos específicos tanto edométricos de laboratorio (Redolfi, 1980; Rocca et al., 1992), como de carga “in-situ”. En la Figura 1 se esquematiza el método de Redolfi (1980) para caracterizar estos suelos en laboratorio, y en la Figura 2, el equipo diseñado por Terzariol et al. (1999).

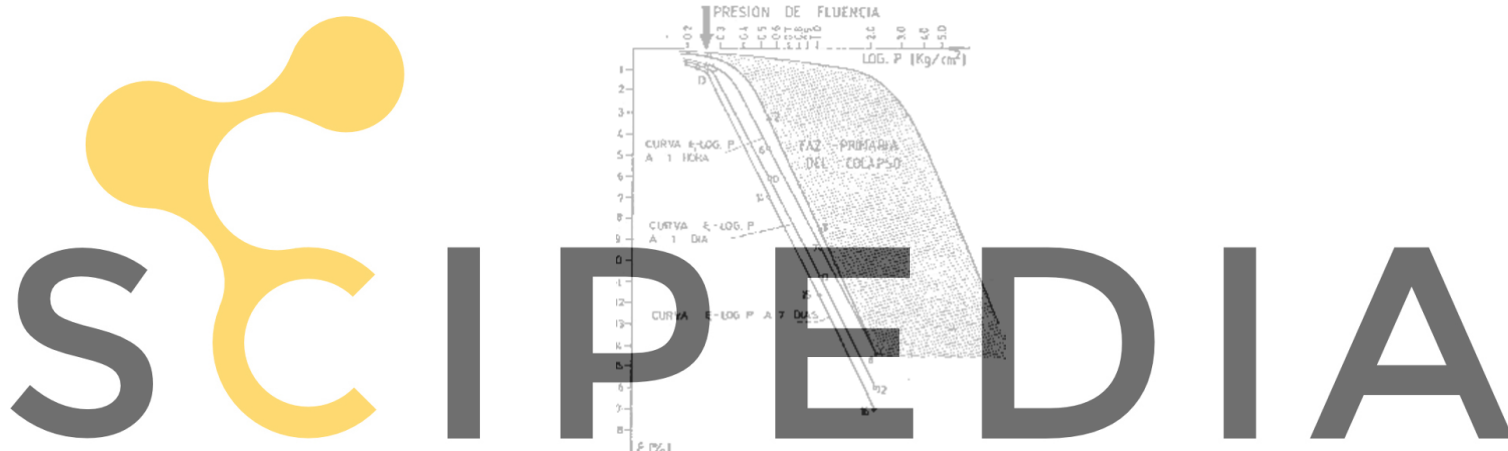


Figura 1: Caracterización suelos colapsables propuesta por Redolfi (1980).

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

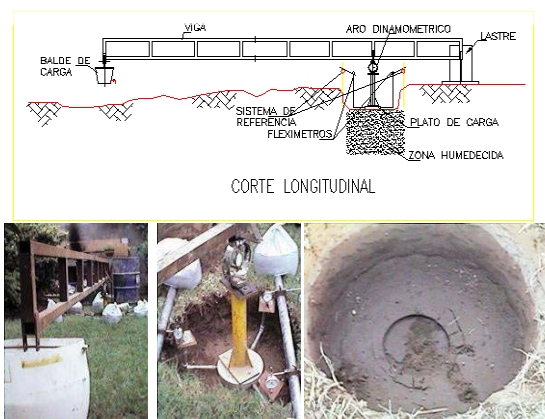


Figura 2: Equipo para determinar colapsabilidad “in situ” (de Terzariol et. al., 1999).

Desde el punto de vista ingenieril resultan de interés un subgrupo de los suelos loésicos cuya propiedad más importante es la colapsabilidad por humedecimiento que puede provocar asentamientos en las obras que los interesan. Los suelos loésicos cubren aproximadamente un área equivalente al 35% de su territorio continental de Argentina, lo que incluye partes importantes de las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, La Rioja, Catamarca, Santiago del Estero, Chaco y Formosa, y en menor medida San Juan, San Luis, Mendoza y La Pampa. Esta área posee sectores con climas áridos y semiáridos. Una parte de la zona abarcada por los mismos se puede apreciar en la Figura 3.



Figura 3: Distribución de suelos loésicos en Argentina (de Terzariol, 2007a).

No todos los suelos loésicos ubicados en esa área tienen características colapsables pero sí en una parte importante de ellos. El área importante que ocupan y sus características hacen que sean un importante tópico de investigación de la Ingeniería Geotécnica.

En la provincia de Córdoba, los loess constituyen el principal suelo regional. Sus propiedades han sido expuestas en numerosas publicaciones (Moll, 1975; Moll, et al., 1988). Los suelos colapsables son un grupo de suelos macroporosos cuya estructura interna se encuentra en equilibrio metaestable. Variaciones en las condiciones externas, como el grado de humedecimiento y/o el estado tensional, producen el colapso brusco de la estructura del suelo, con la manifestación macroscópica de grandes deformaciones en la masa del suelo.

Reginatto (1977) señala que, en general, los suelos colapsables presentan una serie de características comunes, tales como:

- Estructura macroporosa, con índice de poros (e), entre relativamente alto a muy alto.
- Granulometría predominantemente fina, con predominio de fracciones de limos y de arcilla. El tamaño de los granos es generalmente poco distribuido y con los granos más grandes escasamente meteorizados. La mayoría de las fracciones finas de la fracción arcillosa son relativamente escasas, pero su embudo tiene un influencia importante en el comportamiento mecánico de la estructura intergranular.
- Estructura mal acomodada, con partículas de mayor tamaño separadas por espacios abiertos, y unidas entre sí por acumulaciones o "puentes" de material predominantemente arcilloso. En muchos casos existen cristales de sales solubles insertados en tales puentes o uniones arcillosas.

Zur y Wisemam (1973) definen como colapso a cualquier disminución rápida de volumen del suelo, producida por el aumento de cualquiera de los siguientes factores:

- Contenido de humedad (w)
- Grado de saturación (S_r)
- Tensión media actuante (τ)
- Tensión de corte (σ)
- Presión de poros (u)

Reconociendo por lo tanto que el colapso de la estructura del suelo puede producirse por una variedad de procesos diferentes de la saturación. Reginatto (1977) sugiere que a esta lista de factores puede agregarse la interacción química entre el líquido saturante y la fracción arcillosa.

En particular los suelos regionales a que esta presentación se refiere son los colapsables por humedecimiento, por lo tanto, en lo sucesivo cuando hablar de suelos colapsables, se entenderá que son aquellos suelos en que un aumento en el contenido de humedad provoca una brusca disminución de volumen.

A partir de esta definición, se advierte:

- Por un lado una destrucción o un cambio en la estructura que el suelo tenía originalmente, y
- Por el otro lado, un agente externo: el agua, que provoca este fenómeno.

A su vez estos suelos pueden dividirse en “auto-colapsables” y “potencialmente colapsables”. La diferencia entre ambos radica en que para los primeros el mero incremento en su contenido de humedad es suficiente para provocar el colapso de su estructura interna, mientras que en los segundos, además de ese humedecimiento, es necesaria la acción de una carga externa. Esta última situación se da en los suelos que han sufrido un humedecimiento en su historia geológica y por ende ya han colapsado bajo su propio peso, o bien en materiales que tenga una cementación débil o una cohesión aparente que pueda desaparecer por el humedecimiento.

El grado de saturación necesario para provocar el colapso es menor al 100%, variando significativamente con la humedad natural del suelo. En las zonas semi-áridas donde la humedad natural puede ubicarse entre 10 y 12% la humedad necesaria para producir el colapso se ubica por encima del 16/18%, mientras que en regiones áridas donde la humedad natural es de entre el 3 al 6%, una humedad del 10% es suficiente para producir el colapso.

La magnitud del colapso de un manto de suelos colapsables de espesor H_t , que en todo ese espesor se ha incrementado la humedad suficientemente como para producir el colapso, puede definirse como:

$$W_{col,t} = \sum_{j=1}^n W_{col,j} = \sum_{j=1}^n \delta_{col,j} \times H_j \quad (1)$$

donde:

$H_t = H_1 + H_2 + \dots = H_j + \dots + H_n$

H_j = espesor del estrato j

$W_{col,j}$ = asentamiento por colapso del estrato j

$\delta_{col,j}$ = colapso relativo del estrato j a σ_{zj}

σ_{zj} = tensión total en el estrato j .

Como se aprecia depende del espesor del manto colapsable, de la colapsabilidad del mismo (colapso relativo), del incremento de tensión y del grado de humedecimiento. Este colapso relativo puede definirse como:

$$\delta_{col} = \frac{h_{HN} - h_s}{h_1} \quad (2)$$

Siendo:

h_{HN} = altura de la probeta a humedad natural (antes de humedecer) cargada a una presión cualquiera σ

h_{SAT} = altura de la probeta saturada (después de producido el colapso) cargada a la presión σ .

h_1 = altura de la probeta a humedad natural cargada a una presión axial igual al peso propio del suelo letra tipo.

Este valor se obtiene mediante ensayos edométricos de laboratorio o de campo y es una característica intrínseca del material.

El colapso de la estructura interna del suelo, como se ha dicho, se traduce en un cambio brusco de volumen lo que provoca asentamientos importantes del suelo con los consiguientes daños a las estructuras fundadas sobre ellos, fenómenos de fricción negativa en los pilotes que los atraviesan, fenómenos de erosión superficial en escurrimientos de agua, erosión tubificada, etc. Todo ello genera graves problemas de funcionamiento de obras lineales como caminientos, canales y líneas de tendido u obras puntuales. En la figura 4 se puede apreciar algunos ejemplos de estos problemas.

Desde el punto de vista ingenieril las formas de afrontar estos problemas pueden describirse con el siguiente agrupamiento propuesto por Aitchison (1973):

- Tratamiento del suelo colapsable con vista a eliminar la tendencia al colapso a lo largo de todo el estrato de suelos desmoronables.
- Diseño de elementos constructivos que eliminen o disminuyan a límites razonables la posibilidad que se inicie el colapso.
- Diseño de estructuras y/o cimentaciones insensibles a los asentamientos provocados por el colapso, por ejemplo, fundaciones profundas apoyadas sobre un manto profundo no sujeto a los asentamientos por humedecimiento.

De todo lo expuesto se puede inferir la importancia del estudio de estos suelos en esta región y por ende de las investigaciones llevada a cabo en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba.



Figura 4: Viviendas de una planta dañadas y erosiones en un cauce natural (de Terzariol, 2007)

CASO DE AUTOCOLAPSO ANALIZADO

Asentamientos en un canal de abastecimiento de agua y riego

A lo largo de las décadas de 1960 y 1970 se construyó en la provincia de Córdoba el canal “Los Molinos – Córdoba”, de aproximadamente 60 km de longitud, para abastecimiento de agua potable a la ciudad de Córdoba y riego. Como se aprecia en la Figura 5, el mismo nace de un azud nivelador ubicado sobre el río Los Molinos aguas abajo del dique homónimo, y bordea el mismo hacia el Este para luego dirigirse hacia el Norte en dirección a la localidad de San José de la Quintana. De allí, siempre en dirección Norte atraviesa el Río Anisacate, y luego de algunos kilómetros continúa con dirección Sur hasta proximidades del cruce entre la Ruta N° 36 y el Río Xanaes. En este punto su rumbo toma nuevamente dirección Norte, pasa en proximidades de la localidad de Rafael García, atraviesa el camino a San Carlos y continua paralelo a éste hasta un derivador que, por una parte abastece de agua a la Planta Potabilizadora ubicada en proximidades de la localidad de Bouwer y por otra se divide en una serie de canales de riego menores que sirven al cinturón verde de la ciudad de Córdoba.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

El canal es de tipo gravedad y se construyó en concreto (Figura 5) y tiene un espesor de 100 cm en algunos puntos y de 50 cm en otros. El mismo se conduce siguiendo curvas de nivel relativamente próximas, de modo de mantener una pendiente razonable desde el punto de vista hidráulico.

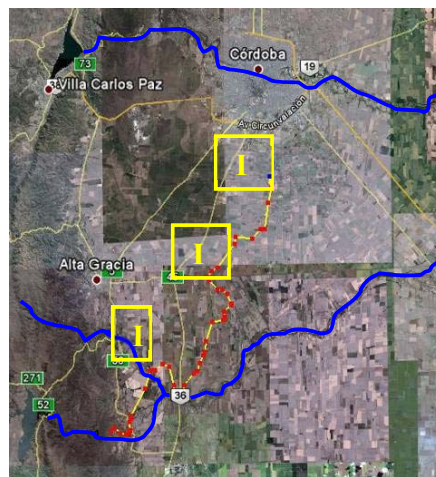


Figura 5: Trazo del canal “Los Molinos – Córdoba”.

Esta situación conlleva a que la obra intercepte el escurrimiento natural de las aguas en toda la traza, para lo cual se han construido pasos de aguas, puentes canal, sifones, cunetas de guarda, terraplenes laterales, con diversa fortuna en

cuanto a su cometido. A su vez todos los caminos vecinales atraviesan el canal mediante obras de arte. Todo esto se aprecia en la Figura 8.

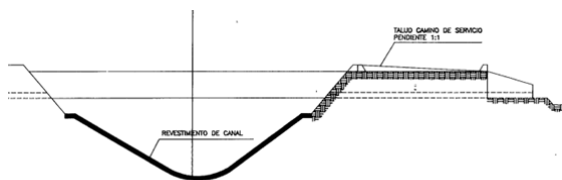


Figura 6: Sección típica del canal y de los cruces superiores.

Caracterización del perfil geotécnico

En general los suelos que afectan al canal son suelos colapsables (Terzariol, 2008), pero en algunos sectores pueden encontrarse mantos de arenas e incluso rocas aflorantes. Los asentamientos de los suelos colapsables que rodean al canal hacen que aparezcan singularidades tales como agrietamientos u oquedades, en los campos vecinos.

Por tratarse de una región semiárida, el régimen de lluvias es torrencial durante los tres meses de verano y es prácticamente nulo durante el resto del año. Al producirse las lluvias torrenciales y no existir cursos de agua permanentes, salvo los ríos ya mencionados, el agua circula como una gran lámina que afecta a toda la zona por igual. Cuando esta lámina de agua encuentra las singularidades mencionadas comienza una erosión, originalmente superficial, que forma cárcavas retrogradantes, erosionando los suelos superficiales hasta encontrar algún manto cementado que interrumpe su penetración. En otros puntos, pueden generar erosión tubificada que circula por debajo las obras lineales como caminos, canales, etc. Estas tubificaciones reciben localmente el nombre de “mallines”.

En la Figura 7 se pueden observar algunas fotografías de la secuencia de problemas descritos en los campos vecinos y en proximidades del canal en estudio.



Figura 7: Secuencias de formación de una cárcava y un mallín.

Para una mejor descripción se divide la traza en dos sectores principales, y a uno de los cuales se lo separa en dos sub-sectores secundarios, por presentar dos tipos constructivos diferenciados.

Zona I (Entre la obra de toma y el cruce con Ruta N° 36)

Este tramo fue el primero en ser construido. La cubierta predominante está formada por limos arenosos y arenas de poco espesor, debajo de la cual subyacen rocas masivas (Gneiss y Granitos) o conglomerados de la Formación Estancia Belgrano, formados por aluviones cementados en matriz limo-arcillosa cementada. Estos últimos se encuentran en zonas más próximas a la Ruta Nacional N° 36 mientras que los primeros son preponderantes en proximidades de la obra de toma. Los limos tienen baja plasticidad (aproximadamente 4 % de IP). Las humedades detectadas se ubican entre 7% y 13% que son las habituales para estos materiales en estado natural. De acuerdo a los resultados de los ensayos de laboratorio, estos

limos son potencialmente colapsables. Su compacidad es baja presentando menos de 10 golpes del ensayo SPT para los limos en estado de humedad natural.

Los estratos de arenas presentan granulometría fina a mediana con intercalaciones de gravas. Estas arenas presentan compacidad media a alta con un valor medio del ensayo SPT de 30 golpes. En esta Zona el canal prácticamente no presenta daños de importancia.

Zona II (Entre el cruce con Ruta N° 36 y la obra de toma para la Planta)

En esta Zona el canal atraviesa suelos predominantemente limosos, de origen eólico (loess). Se trata de materiales de baja plasticidad (Índice de Plasticidad igual a 2,0 al 6,0%) y Límites de Consistencia relativamente bajos, con Límite Plástico entre 18 y 23% y Límite Líquido entre 21 y 30%, y según la clasificación unificada corresponden a suelos ML o CL-ML. La relación de vacíos de estos suelos es próxima a 1, con lo cual la humedad de saturación es cercana al 33,0%, mientras que la humedad natural se ubica entre el 7,0% y el 11,0%. En general, el nivel freático es profundo, más de 20 metros. Son suelos muy erosionables superficialmente lo que provoca desertificación en los campos vecinos a la obra y arrastre de material cultivable. La compacidad de estos materiales es baja ubicándose los resultados de los ensayos SPT entre 5 y 10 golpes.

En todas las perforaciones y pozos se detectó que la humedad en proximidades de los daños en el canal era elevada, ubicándose entre el 18% y el 31%, es decir entre el 60% y el 90% de la humedad de saturación. Esta humectación es suficiente para provocar el colapso de estos suelos metaestables. Los ensayos de laboratorio muestran que el manto limoso superficial presenta en general un perfil con características potencialmente colapsables, y sólo en algunos puntos se detectaron zonas de suelos auto colapsables. En esta zona se encuentra el mayor número de daños. En general los daños más importantes se encuentran en los sectores donde el canal se ha construido a media ladera o cuando la excavación es poco profunda.

Desde el punto de vista constructivo esta zona del canal, a su vez, puede dividirse en dos sub-zonas.

- Sub Zona II-a (entre algunos kilómetros después de atravesar el cruce con la Ruta Nacional N° 36 y las proximidades de Rafael García): En el tramo la construcción del canal fue por simple excavación o terraplenado, de acuerdo a la topografía, sin ningún mejoramiento ni sustitución de suelos. Dada la sección en tolva, es de suponer que el perfilado pudo presentar algunos problemas y por haberse detenido el avance de la obra durante varios años antes de emprender la segunda etapa, se produjeron daños aún antes de que el canal entrara en servicio. En esta sub-zona los daños son repentinos y sin previo aviso. Al fisurarse una losa, casi de inmediato se rompen las laterales, al igual que el avance de una fractura en un vidrio.
- Sub Zona II-b (entre las proximidades de la localidad de Rafael García y la toma para la Planta Potabilizadora): En este tramo el canal se construyó en una etapa más reciente y se ejecutó mediante mejoramiento y/o sustitución de suelos. La metodología consistió en la excavación de un cajero con sobre ancho de aproximadamente 2,00 metros respecto de la sección final del canal. Este cajero se rellenó por capas mediante la colocación de suelo-cal, dejando una trinchera central donde se construiría el canal. Una vez colocado el suelo-cemento se perfilaba con las dimensiones del canal y se procedía a construir el revestimiento con las mismas características que en la sub-zona anterior. En esta sub-zona no son tan abruptos, sino más progresivos en el tiempo lo que permite su reparación más eficiente si son detectados oportunamente.

Descripción de los daños relevados y reparaciones

Los daños consisten en agrietamientos, roturas y colapsos de las losas de revestimiento, roturas en los sifones o en sus uniones y hundimientos generales del canal y la zona de influencia. Los movimientos del revestimiento pueden provocar dislocaciones máximas del orden de 30 a 50 cm, mientras que los asentamientos generalizados alcanzan valores superiores a 1,00/1,50 metros.

Terzariol (2008) indica que las reparaciones más elementales, en el caso de rotura o agrietamiento del revestimiento, consisten en cubrir el canal con una geomembrana impermeable, la que se toma de los bordes superiores, ya sea con muretes de hormigón o cubiertas de suelo vegetal. En el caso de hundimiento generalizado se levantan muretes de hormigón en las zonas de desborde, las que continúan asentándose. Algunos tramos quedaron sin revancha hidráulica, y se han demolido algunos puentes que entorpecían el escurrimiento del agua.

Los asentamientos producidos a lo largo de la traza del canal se han graficado en la Figura 8, donde se ve el perfil del fondo del canal, del borde superior actual y del nivel de escurrimiento de agua.

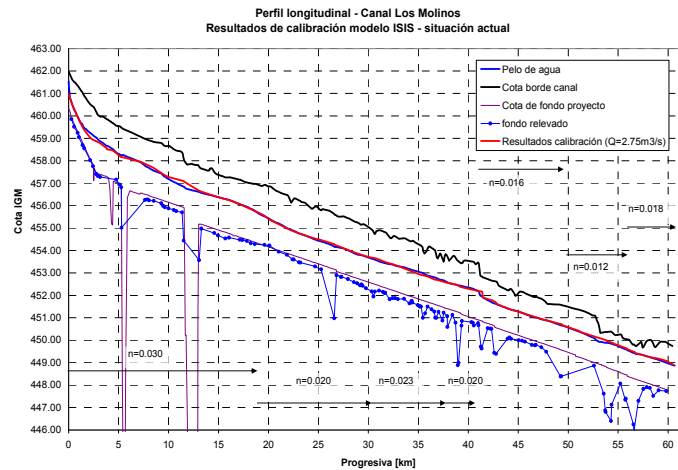


Figura 8: Perfiles del canal a lo largo de la traza.

Los intentos de reparación más importantes consisten en rellenar los mallines detectados y construir pantallas de intercepción, de 4,00 metros de profundidad, para evitar que las tubificaciones alcancen el canal. En algunos casos estas reparaciones han resultado satisfactorias, mientras que en otros no han dado solución alguna.

En la Figura 9 se puede apreciar las vistas de un puente antes y después de los asentamientos por colapso, mientras que en la Figura 10 se observan secciones del canal sin asentamientos y luego del asentamiento.



Figura 9: Vista de un puente original y asentado. Figura 10: Vistas del canal sin daños y con asentamientos.

En la sub-zona IIa, en general el suelo ubicado detrás de las losas colapsa o se tubifica, se fisura la losa de revestimiento y el agua del canal ocupa el espacio del suelo. En esta situación se procede al sellado mediante la geomembrana con lo que se impide el ingreso de agua desde el canal. El agua exterior es conducida por la tubificación y en estas circunstancias el empuje del agua del canal sobre la losa sin respaldo posterior provoca la rotura progresiva de los paños de revestimiento ubicados aguas arriba y abajo de la zona afectada, provocando un efecto dominó. El agua ingresada desde el canal, ya sea por los agrietamientos descritos o bien por deficiencias en las juntas con las obras de arte, provoca a su vez el colapso del suelo lo que provoca asentamientos mayores que arrastran a todo el suelo del sector afectado incluido el canal y los campos vecinos. Esta situación genera el desborde las aguas conducidas por el canal o el anegamiento de campos vecinos al cambiar la pendiente general.

Por su parte en la sub-zona IIb el suelo-cal disminuye la posibilidad de aparición brusca de daños en el revestimiento y no se produce la desaparición del suelo ubicado detrás del revestimiento, lo que hace que las reparaciones preliminares surtan un efecto mejor. De todos modos, la presencia de mallines subyacentes genera colapsos generalizados con resultados similares a los de la sub-zona 2-1.

Cuando se han construido barreras de intercepción, su escasa profundidad y longitud no han impedido en algunos puntos que los mallines las superaran por debajo o las esquivaran lateralmente, con el respectivo daño al canal.

En general, a lo largo de la traza se detectan escasos sistemas de control del drenaje de las aguas superficiales provenientes de las escorrentías de lluvias torrenciales que son interceptadas por el canal.

Interpretación de la problemática

De la simple descripción de los daños y el perfil geotécnico no logra interpretarse la magnitud y la distribución de los mismos a lo largo de la traza. Para ello es necesario comprender que los daños son provocados por la acción del agua externa al canal cuyo escurrimiento superficial, como se ha dicho, provoca erosiones o tubificaciones al encontrarse con singularidades próximas al canal y en general provocadas por la construcción y funcionamiento de éste, sumado al hecho de la falta de captación del agua superficial que afecta a la obra.

Como se ha indicado los daños más significativos se han producido en la zona II y en particular en las sub-zona IIb. En la Figura 11 se pueden apreciar las cuencas de aporte a lo largo del canal y su influencia relativa a la traza del canal.



Figura 11: Cuencas de aporte laterales al canal.

La zona I, tiene una zona de aporte reducida y además los suelos locales no son colapsables e incluso aparecen mantos rocosos aflorantes. Por lo tanto los daños son prácticamente inexistentes y se circunscriben a problemas puntuales de fácil resolución.

En toda la zona II los suelos hallados son potencialmente colapsables.

La sub zona IIa, presenta una cuenca de aporte de mediana envergadura y por la topografía del sector el canal discurre por secciones excavadas en trinchera o bien excavadas desde la superficie, pero casi sin secciones en terraplén. El escaso aporte de agua y el hecho que por la topografía las aguas tienden a no interceptar el canal (excavación en trinchera), hacen que los daños en el sector sean de media intensidad ubicados en tramos cortos y bien diferenciados.

Finalmente la sub zona IIb, por su parte es la que presenta la mayor área de aporte, y por su topografía muy plana el canal presenta zonas con sección semi-enterrada o bien en terraplén con muy pocos tramos en los que se han previsto cunetas de guarda y pasos de agua inferiores.

Consideraciones finales

Pueden enumerarse los siguientes puntos como observaciones finales en esta obra:

Los suelos detectados en la Zona I son suelos no colapsables o afloramientos rocosos. Esto, combinado con una escasa área de aporte de aguas superficiales, explica la ausencia de daños importantes independientemente del método constructivo empleado, ya que no se realizó ninguna mejora del suelo hormigonando el revestimiento del canal directamente sobre la excavación.

Los suelos detectados en la sub-zona IIa son potencialmente colapsables, pero con una escasa cuenca hídrica que la afecta. Esto combinado con la topografía local que minimiza la intercepción de esta agua con la traza da como resultado un nivel de daños controlable. En esta zona el método constructivo empleado, idéntico a la Zona I, hace que los daños se han localizados y en poco tiempo con propagación frágil de los agrietamientos de las losas de revestimiento.

Los suelos de la sub-zona IIb son potencialmente colapsables y la cuenca de aporte es la más grande de la obra. Por su parte, la topografía local obliga a secciones excavadas que interceptan el escurrimiento de las aguas superficiales sin la adecuada cantidad de obras de captación ha desembocado en daños generalizados y muy importantes. El método constructivo, con sustitución de suelos mediante el empleo de suelo cal, ha controlado los daños en cuanto a su propagación en el revestimiento y ha permitido realizar reparaciones programadas.

CONCLUSIONES

Los suelos colapsables son los principales suelos regionales de la zona central de la República Argentina. Particularmente en dicha zona se encuentran varias ciudades capitales de distintas provincias. La ciudad de Córdoba es la segunda del país, por importancia económica y número de habitantes, y se encuentra dentro de la zona descrita.

El Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba hace más de 40 años que estudia estos suelos, desarrollando ensayos de campo y laboratorio para su caracterización, realización de pruebas sobre prototipos a gran escala, la determinación de parámetros geotécnicos relevantes mediante pruebas no destructivas, la generación de modelos para predecir el avance del humedecimiento y los asentamientos resultantes y el planteo de métodos de diseño mediante mejoramiento de suelos y para fundaciones profundas en este tipo de materiales.

El empleo de estos desarrollos ha permitido la comprensión y el diseño de soluciones para problemas generados en suelos colapsables tal como lo demuestra el estudio del caso descrito en este artículo.

REFERENCIAS

- Aiassa, G.M. (2008). "Caracterización de Procesos de Infiltración en Estado No Saturado Sobre Suelos Limosos Compactados", Disertación Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Aiassa, G., Zeballos, M.E., Arrua, P. y Terzariol, R.E. (2008). "Infiltración en suelos limosos compactados", XIX CAMSIG (Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica), La Plata, Prov. de Buenos Aires, Argentina.
- Alonso, E.E., Gens, A. y Josa, A. (1990). "A constitutive model for partially saturated soils", *Géotechnique*. Vol. 40, Issue 3, pp. 405-430.
- Fredlund, D.G. (2006). "Unsaturated soil mechanics in engineering practice", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No. 3, pp. 286-321.
- Rocca R.J., Redolfi, E.R. y Terzariol, R.E. (2006). "Características geotécnicas de los loess de Argentina", *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 6, No. 2, pp. 149-166.
- Terzariol, R.E. y Abbona, P.V. (1999). "Determinación del potencial de colapso mediante ensayos in-situ", *Proceedings of the XI Pan American Congress Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. I, pp. 201-207.
- Terzariol, R.E y Redolfi, E.R. (2008). "Informe Técnico Referido a Estudio de Suelos en Canal "Los Molinos – Córdoba" – preparado para Hallcrow por ARRT Ingenieros Consultores, Córdoba, Argentina.